

ANALISIS AWAL GANGGUAN MEKANIS PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DENGAN METODE SWEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS (SFRA)

Dimas Fathoni¹, Chairul Gagarin Irianto²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Trisakti Jakarta 11440

e-mail : ¹dimasfathoni@gmail.com; ²chairul_irianto@trisakti.ac.id

ABSTRAK

Analisis *sweep* respon frekuensi (SFRA) adalah teknik diagnosis yang sensitif untuk mendeteksi atau mengetahui perubahan karakteristik kumparan transformator distribusi dengan menginjeksi tegangan rendah pada rentang frekuensi yang ditentukan. Perubahan tersebut dapat disebabkan oleh kerusakan kelistrikan atau gangguan mekanis (kerusakan pada saat transportasi pengiriman, gempa bumi, hubung singkat, dll). Jenis gangguan yang dapat dideteksi adalah kerusakan pada inti transformator, pergeseran masalah kumparan, dan perubahan bentuk kumparan (deformasi) transformator. Metode pengujian yang dipergunakan disini adalah dengan melakukan perbandingan antara jarak kaki – kaki antar bushing yang di implementasikan dalam bentuk hubungan kurva antara frekuensi dan *magnitude*. Pengujian dilakukan pada satu jenis transformator distribusi D-YN5 dengan kapasitas daya 315 kVA yang berlokasi di PT. PLN Area Kebon Jeruk. Hasil pengujian yang didapat akan di sesuaikan pada acuan standar yang DL/T 911-2004 yang telah ditetapkan.

Kata kunci: *Sweep Frequency Response Analysis*, deformasi transformator, pengujian SFRA, FRAX 101.

Sweep frequency response analysis (SFRA) is a sensitive diagnostic technique for detecting or recognizing changes in the characteristics of the distribution transformer coil by injecting a low voltage across a specified frequency range. Such changes may be caused by electrical damage or mechanical disturbance (damage during transportation of delivery, earthquake, short circuit, etc.). The types of disturbances that can be detected are damage to the transformer core, the shift of the coil problem, and the deformation of transformer. The test method used here is by doing a comparison between the distance of the legs between the bushing which is implemented in the form of curve relationship between frequency and magnitude. The test is performed on one type of D-YN5 distribution transformer with 315 kVA power capacity located at PT. PLN Area Kebon Jeruk. The test results obtained will be adjusted to the standard reference DL / T 911-2004 that has been set.

Keywords: *Sweep Frequency Response Analysis*, transformer deformation, SFRA testing, FRAX 101.

PENDAHULUAN

Transformator adalah peralatan listrik yang sangat vital dimana keandalan operasinya harus tetap terjaga agar proses penyaluran energi listrik berjalan lancar. Seiring meningkatnya beban, operasi transformator juga dihadapkan dengan masalah usia pemakaian dan penuaan. Oleh karena itu, diagnosis peralatan listrik menjadi sangat relevan terutama untuk transformator yang strategis, penting atau sangat berisiko.

Untuk menjaga keandalan dari transformator perlu dilakukan suatu pengujian untuk mengetahui keadaan fisik dari transformator tersebut, salah satunya dengan melakukan uji SFRA (*Sweep Frequency Response Analysis*) yaitu menganalisis perubahan struktur mekanis pada transformator.

Sapu Frekuensi Analisis Respon (SFRA) merupakan metode yang ampuh, non-destruktif dan sensitif untuk mengevaluasi integritas struktur mekanis inti, kumparan-kumparan dan penjepit (*clamping*) pada transformator daya melalui pengukuran fungsi transfer elektrik dengan rentang frekuensi yang luas.

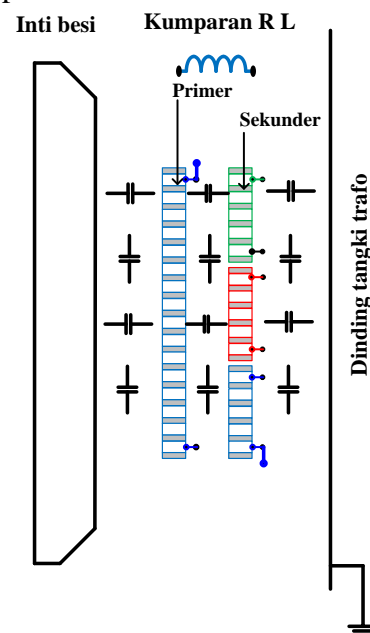
Pada penelitian ini dibahas mengenai penggunaan metode SFRA untuk deteksi perubahan struktur mekanis pada transformator distribusi. Metode SFRA adalah metode pengukuran transformator dalam keadaan offline yang bertujuan untuk mendeteksi kondisi mekanis pada transformator^[1]. Pengukuran SFRA dilakukan dengan menginjeksikan sinyal sinusoidal dengan tegangan konstan dalam rentang frekuensi tertentu. Kemudian respon frekuensi yang dihasilkan akan dianalisis untuk mengetahui kondisi mekanis dari transformator tersebut dengan cara membandingkan hasil pengukuran SFRA transformator pada kondisi tertentu dengan beberapa metode seperti perbandingan transformator dengan berdasarkan waktu,

jenis, bentuk dan jarak antar kaki-kaki *bushing* yang berdasarkan acuan pada standar yang dipergunakan DL/T 911-2004^[1].

TRANSFORMATOR DAN SFRA

A. Karakteristik Mekanikal Transformator

Transformator daya terdiri dari komponen utama inti besi dan belitan konduktor yang masing-masing tersusun menjadi jaringan listrik yang kompleks dan mengandung elemen-elemen tahanan, induktansi-diri, kapasitansi-tanah, induktansi-bersama dan kapasitansi seri, seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema potongan penampang samping komponen utama Transformator

Pemodelan transformator dilakukan untuk mengetahui nilai parameter R (impedansi resistif), L (induktansi) dan C (kapasitansi) yang bertujuan menunjukkan besaran fisik dari komponen-komponen transformator. Jika jaringan transformator tersebut diinjeksikan sinyal frekuensi tertentu maka respon frekuensi jaringan

kompleks tersebut berupa bentuk kurva yang unik oleh karena itu, dapat dianggap sebagai suatu sidik jari (*a fingerprint*). [1].

Nilai kapasitansi transformator dipengaruhi oleh variasi jarak antara konduktor-konduktor. Oleh karena itu, dengan adanya pergeseran kumparan bisa mempengaruhi nilai kapasitansi dan sekaligus merubah bentuk kurva yang dihasilkan. Darik hasil pengukuran sinyal frekuensi respon ini kemudian dibandingkan dengan referensi yang telah pernah diukur sebelumnya untuk mengetahui seberapa besar perubahan kondisi struktur mekanikal pada elemen-elemen aktif transformator. Dari perbedaan nilai parameter RLC itulah dapat dilakukan deteksi awal mengenai kondisi mekanis transformator.[1]

Jika terjadi suatu perubahan geometris pada elemen-elemen rangkaian atau pergeseran tempat diantara elemen-elemen maka bisa menyebabkan penyimpangan pada respon frekuensi. Perbedaan respon frekuensi yang terjadi diantara kurva “sidik jari” FRA dan hasil pengukuran menunjukkan adanya perubahan letak posisi (*deformasi*) atau perubahan status kelistrikan pada komponen-komponen internal transformator. Setiap jenis kerusakan akan memberikan pengaruh yang berbeda pada setiap bagian komponen berdasarkan rentang frekuensinya. Sehingga untuk setiap bagian komponen yang rusak dapat ditentukan apa saja jenis kerusakannya antara satu dengan lainnya.

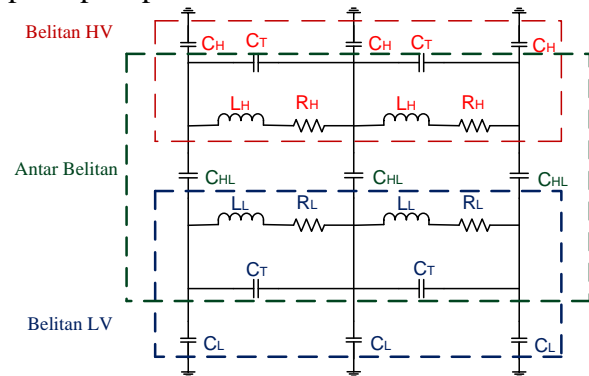
Berdasarkan metode pengujian diagnostik SFRA ini bisa memberikan informasi yang lengkap tentang status mekanik dari setiap bagian aktif pada transformator.

Setiap jenis kerusakan pada bagian aktif transformator akan menimbulkan penyimpangan bentuk pada bagian tertentu dari kurva rentang frekuensi dan berdasarkan pengamatan dari penyimpangan

bentuk kurva dapat diidentifikasi apa jenis kerusakannya.

B. Pengetahuan Dasar tentang Analisis Respon Frekuensi[2,3]

Transformator merupakan jaringan yang kompleks terdiri dari komponen RLC. Jaringan kompleks RLC ini tersusun dari elemen-elemen resistansi belitan tembaga; induktansi kumparan belitan dan kapasitansi dari lapisan isolasi antara kumparan-kumparan, antara belitan-belitan, antara belitan dan inti, antara inti dan tangki, antara tangki dan belitan, dll. Sebuah rangkaian ekuivalen sederhana dengan komponen RLC, seperti pada Gambar 2 dapat digunakan untuk menjelaskan tentang prinsip respon frekuensi.



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen dengan komponen RLC

Setiap bentuk kerusakan fisik pada transformator akan menghasilkan suatu perubahan pada jaringan RLC ini. Perubahan bentuk jaringan RLC ini yang ingin dicari dengan menggunakan respon frekuensi untuk menyoroti adanya perubahan kecil dalam jaringan RLC pada transformator. Tanggapan frekuensi didapatkan dengan menerapkan sinyal frekuensi tegangan rendah yang bervariasi ke belitan transformator dan mengukur sinyal input dan sinyal output. Rasio kedua sinyal memberikan respon yang dibutuhkan. Rasio ini disebut fungsi transfer transformator yang bisa ditentukan

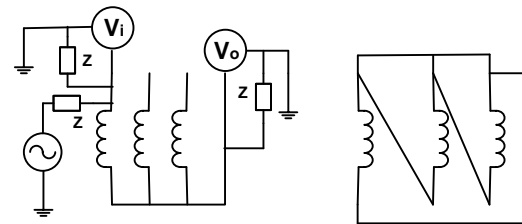
magnitudo dan sudut fasenya. Setiap range frekuensi memiliki jalur impedansi jaringan RLC yang berbeda. Oleh karena itu, fungsi transfer pada suatu frekuensi adalah ukuran efektif dari impedansi jaringan RLC transformator. Setiap deformasi geometris bisa mengubah bentuk jaringan RLC, yang pada gilirannya mengubah fungsi transfer frekuensi yang berbeda dan karenanya bisa menjadi titik fokus daerah mana yang perlu diperhatikan.

B.1. Jenis dari konfigurasi pengujian SFRA

Pelaksanaan pengujian SFRA dibedakan dalam pengujian rangkaian terbuka (*end to end open circuit test*), pengujian hubung singkat (*end to end short circuit test*), pengujian antar-lilitan kapasitif (*capacitive inter turn test*) dan pengujian antar-lilitan induktif (*inductive inter turn test*). Berikut dua contoh rangkaian pengujian hubungan-terbuka dan hubung-singkat seperti pada Gambar 3 dan 4.

Pengujian hubungan-terbuka

Pengujian rangkaian-terbuka dilakukan pada belitan-belitan tegangan rendah (**Low Voltage, LV**) atau tegangan tinggi (**high voltage, HV**). Setiap sinyal input sinusoidal dengan range frekuensi diterapkan pada setiap ujung belitan dan masing-masing sinyal outputnya diukur melalui ujung belitan lainnya, sedangkan terminal output lainnya dibiarkan tetap terbuka, seperti pada Gambar 3. Untuk menguji semua belitan-belitan HV dan LV dibutuhkan enam kali pengujian rangkaian terbuka (*end to end open circuit test*).

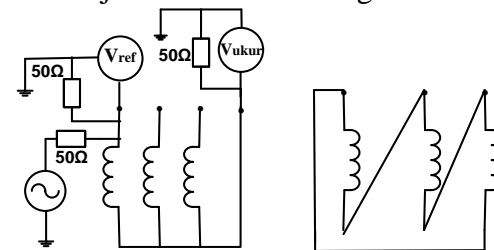


Gambar 3. Hubungan Pengujian Hubungan-terbuka

Plot rentang frekuensi menunjukkan sifat induktif dan kapasitif dari rangkaian belitan. Pada frekuensi rendah, induktor yang ideal memiliki sifat seperti rangkaian hubung-singkat dan pada frekuensi sangat tinggi induktor memiliki sifat seperti rangkaian hubungan-terbuka. Sedangkan untuk kapasitor, pada frekuensi rendah, kapasitor ideal berperilaku seperti rangkaian terbuka dan pada frekuensi tinggi berperilaku seperti rangkaian hubung-singkat.

Pengujian hubung-singkat

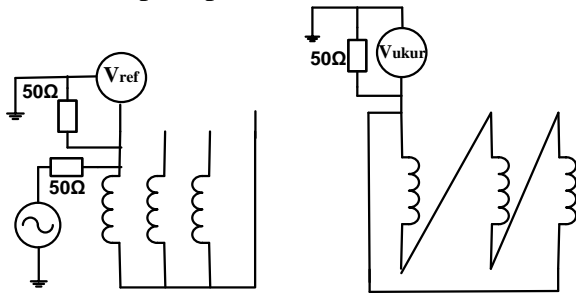
Setiap ujung terminal kumparan diperlakukan seperti halnya pada pengujian rangkaian hubungan-terbuka, tetapi salah satu sisi belitannya dihubung-singkat saat tegangan suplai diterapkan pada sisi belitan lainnya, seperti pada Gambar 4. Selama pengujian hubung-singkat ini, induktansi magnetisasi inti diabaikan dan akibatnya frekuensi resonansi akan bergeser menjadi lebih tinggi. Hal ini memberi penunjukkan bahwaterjadi kerusakan di bagian inti besi.



Gambar 4. Hubungan Pengujian Hubung-singkat

Pengujian Kapasitansi antar-belitan

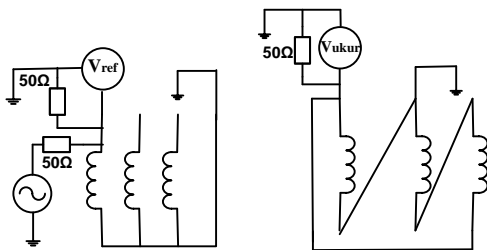
Dalam tes ini, sinyal input diterapkan di salah satu terminal belitan dan sinyal keluaran diukur pada salah satu terminal belitan sekunder dan terminal lain dibiarkan terbuka, seperti pada Gambar 5a.



Gambar 5a. Hubungan Pengujian Kapasitansi antar-belitan

Pengujian Induktansi antar-belitan

Dalam tes ini, sinyal input diterapkan di salah satu terminal belitan dan sinyal keluaran diukur pada satu terminal di belitan sekunder. Terminal yang diukur ditanahkan sedangkan semua terminal lainnya dibiarkan terbuka, seperti pada Gambar 5b.

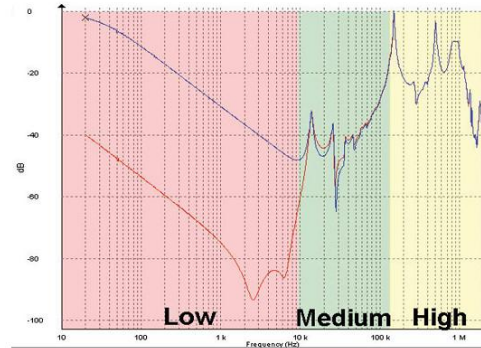


Gambar 5b. Hubungan Pengujian Induktansitansi antar-belitan

B.2. Definisi Fungsi Respon Frekuensi

Secara umum didefinisikan sebagai representasi dari hubungan *input* dan *output* sistem linear dengan kondisi mula – mula nol. Fungsi transfer dapat dinyatakan dalam respon frekuensi, yang merupakan respon fase dan *magnitude* terhadap frekuensi. Respon frekuensi fungsi transfer dapat ditentukan melalui pengukuran respon fase dan *magnitude* dengan eksperimen.

Sweep frequency merupakan metoda langsung untuk menentukan respon frekuensi karena sinyal input dalam daerah frekuensi tertentu langsung diberikan pada alat yang diukur, seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Tingkatan respon frekuensi rendah, medium, tinggipada metode SFRA

APLIKASI DARI SWEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS (SFRA) UNTUK TRANSFORMATOR DISTRIBUSI [3,4,5,6]

SFRA dapat mendeteksi adanya masalah di dalam transformator seperti: deformasi kumparan dan pergeseran, hubung singkat kumparan dan terlepasnya kumparan. Pengumpulan data sidik jari menggunakan SFRA adalah cara mudah untuk mendeteksi masalah elektro-mekanis di dalam transformator daya dan merupakan investasi yang bisa menghemat waktu dan biaya.

Pengukuran dilakukan untuk menangkap "sidik jari" dari transformator. Hasil pengukuran tersebut dibandingkan dengan referensi "sidik jari" dan memberikan jawaban langsung jika bagian mekanik transformator tidak terjadi perubahan atau belum. Penyimpangan pada kurva "sidik jari" menunjukkan terjadinya perubahan geometri dan/ atau elektrik di dalam transformator. Dengan mendokumentasikan data "sidik jari" menggunakan FRA merupakan cara yang mudah untuk mendeteksi masalah elektro-mekanik di

dalam transformator daya dan juga merupakan investasi yang bisa menghemat waktu dan biaya. [1]

A. Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)

SFRA adalah metode pengujian yang dilakukan 1 kali dalam 2 tahun untuk mengetahui kondisi mekanis dari transformator seperti inti dan belitan, sehingga pengukuran SFRA sangat perlu dilakukan untuk menghindari adanya gangguan transfer daya pada transformator. Ada beberapa alasan sehingga harus dilakukan pengujian SFRA, antara lain:

- a. Tahap pembuatan agar diketahui kualitas transformator daya
- b. Terjadinya hubung singkat pada transformator
- c. Adanya pengujian impulse pada transformator
- d. Diketahui terdapat penurunan kinerja dari tekanan mekanis kumparan
- e. Terjadinya perubahan struktur mekanikal pada transformator

Pada peralatan *Sweep Frequency Response Analyzer* terdapat 3 (tiga) probe, yang terdiri dari:

- 1) Probe *Output*, dihubungkan ke terminal *bushing* netral pada belitan transformator konfigurasi Y dengan netral atau dihubungkan ke *bushing* fase pada belitan konfigurasi Δ .
- 2) Probe Referensi, dihubungkan ke *bushing* yang sama dengan probe *output*. Probe ini akan bertindak sebagai acuan titik netral pengukuran.
- 3) Probe *Input*, sebagai probe yang mengalirkan arus/tegangan sinusoidal ke fase yang diukur.

SFRA menginjeksi sinyal input dengan nilai tegangan yang kecil namun dengan frekuensi yang nilainya bervariasi (antara 10 Hz – 1 MHz). SFRA ini kemudian dihubungkan dengan komputer yang akan menampilkan respon frekuensi transformator pada display monitor dengan bantuan *software* FRAX.

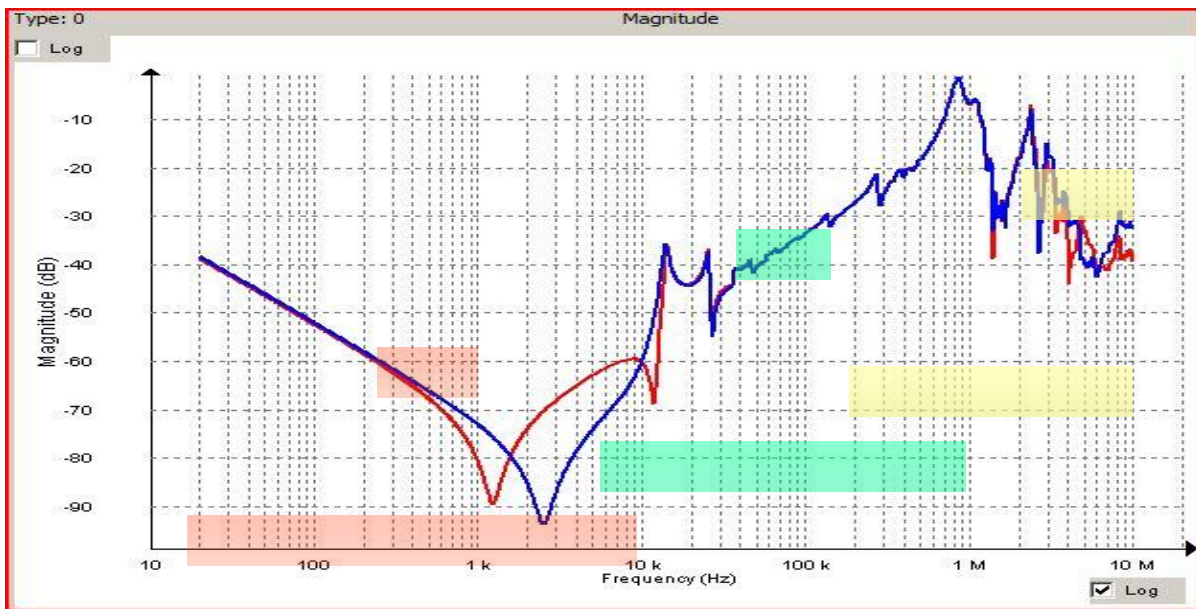
B. Analisis Hasil Pengujian SFRA

Sebagai pedoman umum, bila terjadi masalah hubung singkat di belitan atau masalah magnetisasi di inti bisa mengubah bentuk kurva respon frekuensi pada range frekuensi rendah, yaitu 1 kHz sampai 100 kHz.

Jika perubahan bentuk kurva di frekuensi menengah, 100 kHz sampai 600 kHz, menunjukkan terjadi pergerakan aksial atau radial dalam kumparan sedangkan perubahan bentuk kurva pada frekuensi tinggi, 600 kHz sampai 1 MHz, menunjukkan masalah yang terjadi pada kumparan, bushing dan pengubah tap, seperti pada Gambar 7.

Hasil dari pengukuran SFRA kemudian dibandingkan dengan kondisi normal/ tanpa gangguan. Referensi transformator keadaan normal dapat diperoleh dari:

- 1) Transformator baru atau hasil pengujian transformator dari beberapa tahun sebelumnya.
- 2) Transformator sejenis yang memiliki daya yang sama dan dengan merek dagang yang sama (*sister unit*).
- 3) Belitan fase yang sama dari transformator yang lain untuk pengujian kondisi antar fase belitan.



Gambar 7. Penentuan tingkat respon frekuensi pada metode SFRA

ANALISIS TRANSFORMATOR DISTRIBUSI PT. PLN AREA KEBON JERUK DENGAN METODE SFRA [7]

Pada subbab ini dilakukan pengujian pada salah satu transformator distribusi PT. PLN Area Kebon Jeruk. Dalam pengujian SFRA diperlukan langkah-langkah preventif dalam analisis hasil uji yang telah didapat, juga dibahas cara mengolah dan analisis hasil uji yang telah diambil dari transformator.

A. Data Teknis Transformator Pengujian

Data – data teknis sebuah transformator sangat berguna untuk kelangsungan pengujian. Pengujian dengan metode SFRA ini dilakukan pada saat kondisi transformator tidak beroperasi atau dalam keadaan *offline*. Hal itu disebabkan karena pengujian ini membutuhkan pemasangan beberapa kabel probe yang akan terhubung langsung pada bagian transformator.

Setelah terhubung dengan transformator, hasil pengujian dapat dilihat pada laptop yang terkoneksi langsung pada alat FRAX-101. Berikut data teknis transformator distribusi yang akan dilakukan pengujian, seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Teknis Transformator (*nameplate*)

Pabrik	TRAFINDO
Nomor seri	188C
Kapasitas	315 kVA
Vector Group	D-YN5
HV-LV	20000-400 (V)
Tempat pengujian	PT. PLN Area Kebon Jeruk

Menurut standar DL/T 911-2004 sebuah transformator perlu dilakukan pengujian selama 2 tahun sekali untuk mengetahui kondisi mekanis transformator tersebut. Menurut pihak PLN transformator ini masih dalam keadaan baru beberapa bulan, dan belum dilakukan pengujian untuk

mengetahui kondisi mekanis transformator. [5]

Dengan begitu pengujian metode SFRA kali ini dilakukan untuk mengetahui keadaan awal transformator tersebut dan juga nantinya akan dijadikan sebagai sampel referensi yang berguna untuk pengujian berikutnya.

B. Langkah Pengujian SFRA

Pengujian SFRA ini dilakukan dengan menggunakan alat uji yang bernama *FRAX 101 Pax Diagnostic*. Dimana alat ini bersifat *portable* sehingga sangat mudah untuk dibawa, seperti pada Gambar 8. Metode pengujian yang dipergunakan pada SFRA ini adalah dengan perbandingan jarak antar kaki-kaki bushing. Hal ini dikarenakan tidak adanya data referensi awal dari pihak PT PLN (Persero) yang seharusnya dipergunakan untuk perbandingan hasil pengujian.



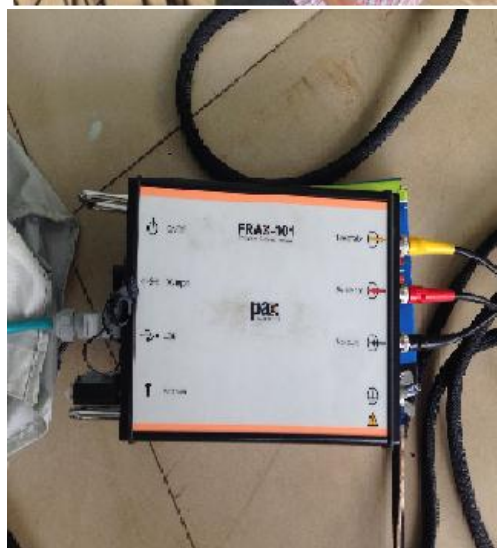
Gambar 8. Alat FRAX-101

SFRA merupakan sebuah metode yang tujuan utamanya untuk mendeteksi pergerakan mekanis pada kumparan transformator. Pergerakan mekanis tersebut mengacu pada bagian dalam transformator (kumparan, inti, dll) yang berhubungan satu sama lain. Perubahan kumparan menghasilkan suatu kegagalan pada transformator dengan merusak isolasi, sehingga akan timbul hubung singkat secara bergiliran pada transformator. Transformator sendiri sebenarnya diharapkan bertahan

dalam jangka waktu yang lama. Tetapi dengan adanya gangguan dan perubahan mekanis yang terjadi menyebabkan umur dari transformator itu sendiri akan berkurang.

Langkah pertama pengujian diawali dengan pemasangan kabel probe pada alat FRAX-101 yang nantinya terhubung pada bushing pada transformator, seperti pada Gambar 9.

Kemudian kabel probe yang terhubung pada transformator dipasang pada bushing, yang nantinya pemasangan kabel probe tersebut akan disesuaikan untuk kebutuhan pengujian dengan metode SFRA ini. Berikut hubungan kabel probe terhadap ujung terminal belitan transformator, *bushing* untuk pengujian tegangan tinggi antara H1 dan H2, seperti pada Gambar 10.



Gambar 9. Kabel probe terhubung dengan FRAX-101



Gambar 10. Pemasangan kabel probe terhadap bushing untuk pengujian tegangan tinggi (H1) dengan (H2) pada software.

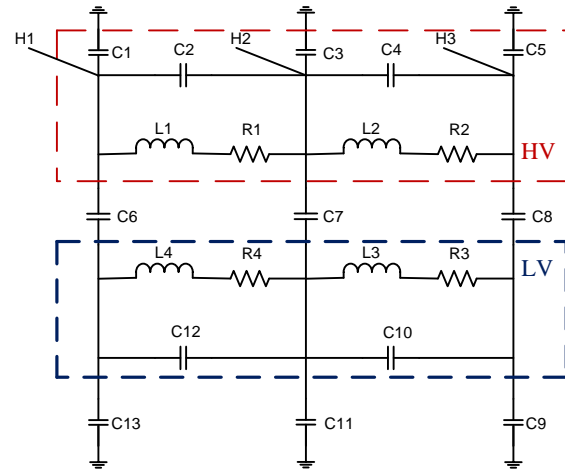
Sedangkan, hubungan kabel probe terhadap ujung terminal belitan transformator, **bushing** untuk pengujian tegangan tinggi antara ujung-ujung terminal H1-H2-H3 dengan terminal x1-x2-x3 sisi tegangan rendah yang dihubungkan-singkat, seperti pada Gambar 11.



Gambar 11. Pemasangan kabel probe terhadap bushing untuk contoh pengujian tegangan tinggi (H1-H2-H3 dengan x1-x2-x3 dihubungkan singkat) pada software.

Berikut rangkaian ekuivalen transformator untuk pengujian pada tegangan tinggi, seperti pada Gambar 12 dan 13. Hubungan kabel probe yang terhubung pada sisi tegangan tinggi, HV transformator dengan menghubungkan antar ujung-ujung

terminal H1-H3; H1-H2; H2-H3 diperoleh rangkaian ekuivalen pengujian seperti pada Gambar 12.



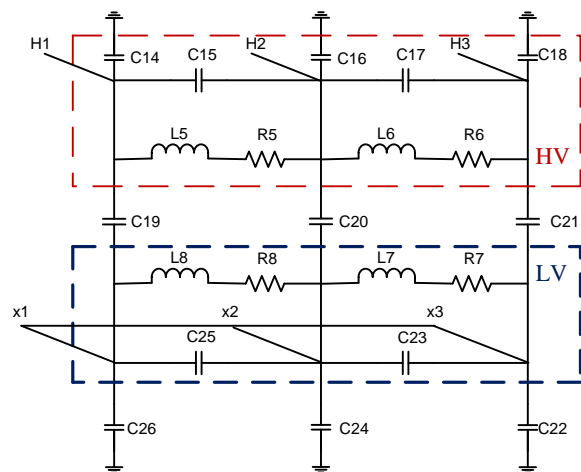
Gambar 12. Rangkaian ekuivalen transformator untuk pengujian pada tegangan tinggi dengan menghubungkan (H1-H3; H1-H2; H2-H3).

Sedangkan, hubungan kabel probe yang terhubung pada sisi tegangan tinggi, HV transformator dengan menghubungkan antar ujung-ujung terminal H1-H3; H1-H2; H2-H3 terhadap terminal sisi tegangan rendah, LV: x1-x2-x3 dihubungkan-singkat, diperoleh rangkaian ekuivalen pengujian seperti pada Gambar 13.

C. Hasil Pengujian SFRA

Berdasarkan data yang diperoleh di lapangan, berikut hasil analisis keadaan transformator distribusi 3 fase PT. PLN Area Kebon Jeruk dengan mengacu pada standar yang digunakan dalam hal ini yaitu DL/T 911-2004.

Pada subbab 2.3 dan 2.4 telah dijelaskan ada 3 (tiga) bagian atau rentang distorsi frekuensi pada kurva yang menggambarkan daerah mana saja yang mengalami gangguan pada transformator itu sendiri.

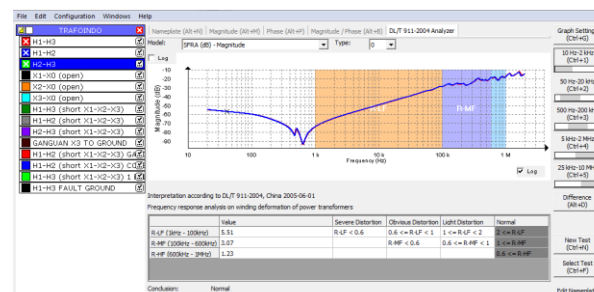


Gambar 13. Rangkaian ekivalen transformator untuk pengujian pada tegangan tinggi dengan menghubungkan (H1-H2-H3 dengan x1-x2-x3 dihubungkan-singkat).

Berikut ini adalah hasil awal dari analisis pengujian dengan metode SFRA terhadap transformator distribusi 3-fase yang di uji dengan software FRAX dalam bentuk kurva, seperti pada Gambar 14.

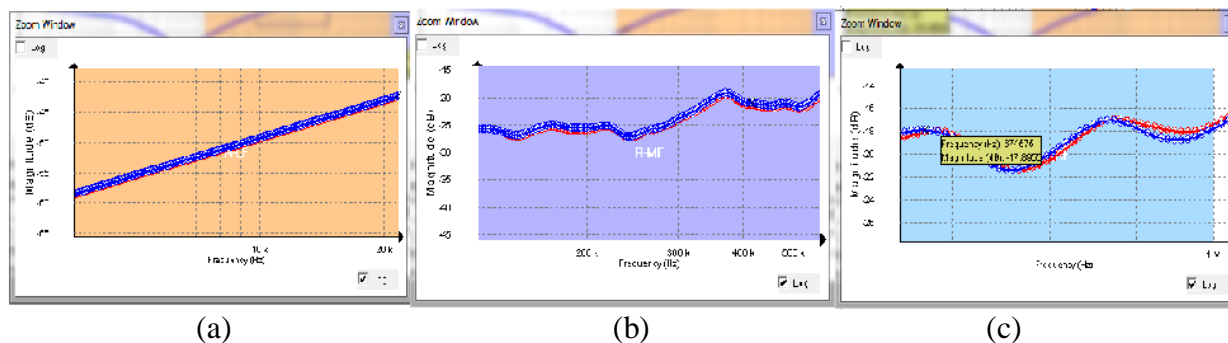
Dari hasil hubungan (H1-H3; H1-H2; H2-H3) kurva HV, jika dilihat hasil kurva pada R-LF, R-MF, dan R-HF menurut standar DL/T 911-2004 nilai dari faktor relatif yang didapat pada setiap rentang frekuensi menunjukkan kondisi

transformator masih dalam keadaan normal dan tidak mengalami gangguan, masing-masing seperti pada Gambar15(a), (b) dan (c).

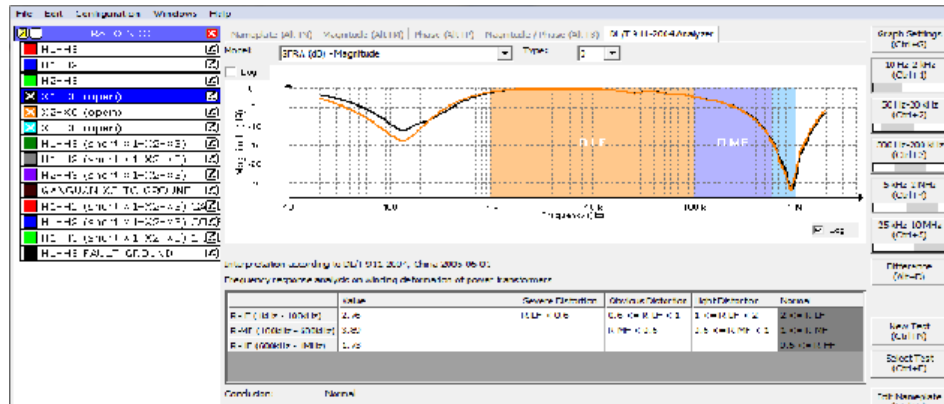


Gambar 14. Kurva HV (*High Voltage*) saling berhubungan.

Sedangkan, dari hasil hubungan ujung-ujung terminal belitan sisi tegangan rendah, LV (x1-x0; x2-x0; x3-x0) yang dihubungkan terbuka maka kurva LV, jika dilihat reaksi pada rentang frekuensi R-LF, R-MF, dan R-HF menurut standar DL/T 911-2004 nilai dari faktor relatif yang didapat pada setiap rentang frekuensi menunjukkan kondisi transformator masih dalam keadaan normal dan tidak mengalami gangguan, seperti pada Gambar 16.



Gambar 15. Gambar kurva (a)plot rentang frekuensiR-LF, (b)untuk rentang frekuensiR-MF, dan(c) rentang frekuensiR-HF yang saling berimpitan.



Gambar 16. Kurva LV (*Low Voltage*) Open.

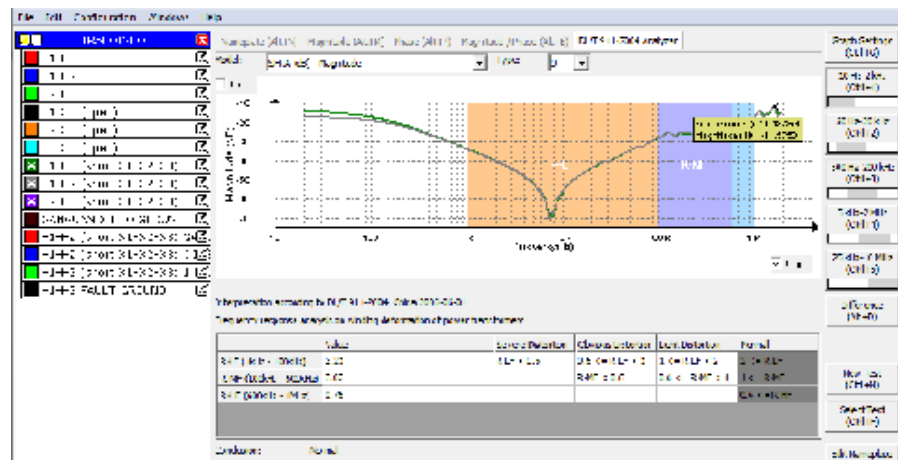
Demikian pula, dari hasil hubungan antara (H1-H3; H1-H2; H2-H3) kurva HV terhadap (x1-x2-x3) LV yang dihubungkan singkat, jika dilihat reaksi pada R-LF, R-MF, dan R-HF menurut standar DL/T 911-2004 nilai dari faktor relatif yang didapat pada setiap rentang frekuensi menunjukkan kondisi transformator masih dalam keadaan normal dan juga tidak mengalami gangguan, seperti pada Gambar 17.

Transformator pengujian ini masih dalam keadaan normal dan kondisi baru masih beberapa bulan. Sehingga untuk mendapatkan simulasi kurva saat terjadi gangguan mekanis diberikan beberapa

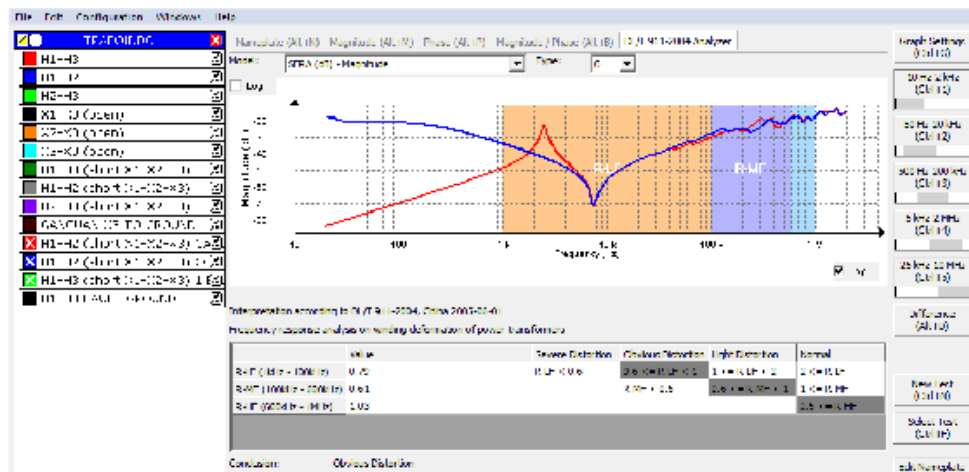
gangguan terhadap transformator pada saat pengujian seperti:

- Gangguan pada kontak transformator dimana salah satu kaki bushing diberi gangguan seperti dialiri arus atau lapisan isolasinya rusak.
- Gangguan pada inti transformator terhadap ground.
- Gangguan pada 1 belitan transformator antar fase R, S, dan T.

Sehingga, dari hasil pengujian hubungan antara (H1-H3; H1-H2; H2-H3) kurva *HV* terhadap (x1-x2-x3) *LV* yang di hubungkan singkat didapatkan kurva seperti pada Gambar 18.



Gambar 17. Kurva Tegangan Tinggi, *HV* terhadap Tegangan Rendah, *LV* yang dihubungkan singkat



Gambar 18. Kurva HV terhubung dengan LV dihubungkan yang diberikan gangguan.

Sehingga didapatkan perbandingan diantara 3 (tiga) kurva seperti yaitu pada Gambar 16, 17, dan 18 dimana menunjukkan indikasi perubahan struktur mekanis pada trafo.

Dari hubungan kurva (*magnitude[dB]; frequency[Hz]*) Gambar 18 didapatkan ketidakselarasan (perubahan bentuk kurva) antara dua kurva, dimana titik-titik perpotongan dua kurva yang mengindikasikan gangguan pada transformator terletak pada frekuensi rendah (*low frequency*) dan pada frekuensi menengah (*middle frequency*), masing-masing seperti pada Gambar 19 dan 20.

Dari hasil Gambar 19, titik perpotongan awal kurva terletak pada saat nilai frekuensi 1840.9 Hz dan *magnitude* -38.3315 dB. Dan titik akhir perpotongan terletak pada saat frekuensi 5610.87 Hz dan *magnitude* -53.0809 dB. Sehingga berdasarkan acuan pada standar DL/T 911-2004 didapatkan nilai faktor relatif pada frekuensi rendah sebesar 0.79. Dimana nilai tersebut terletak pada tingkat gangguan nyata/edang (*obvious deformation*).

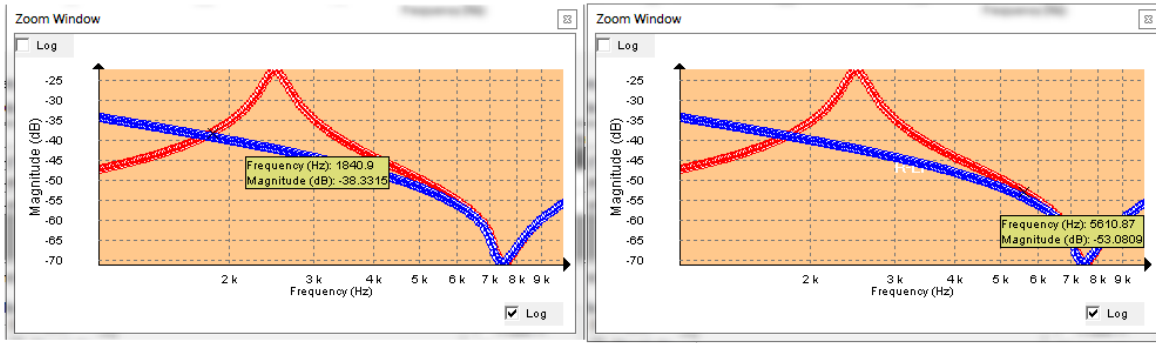
Sedangkan, titik-titik perpotongan kurva pada frekuensi menengah (*middle frequency*) seperti pada Gambar 20. Dari hasil Gambar 20, titik perpotongan awal

kurva terletak pada saat nilai frekuensi 225440 Hz dan *magnitude* -25.3706 dB. Dan titik akhir perpotongan terletak pada saat frekuensi 341217 Hz dan *magnitude* -20.4943 dB. Sehingga berdasarkan acuan pada standar DL/T 911-2004 didapatkan lah nilai faktor relatif pada frekuensi tengah sebesar 0,61 dimana nilai tersebut terletak pada tingkat gangguan ringan (*light deformation*)

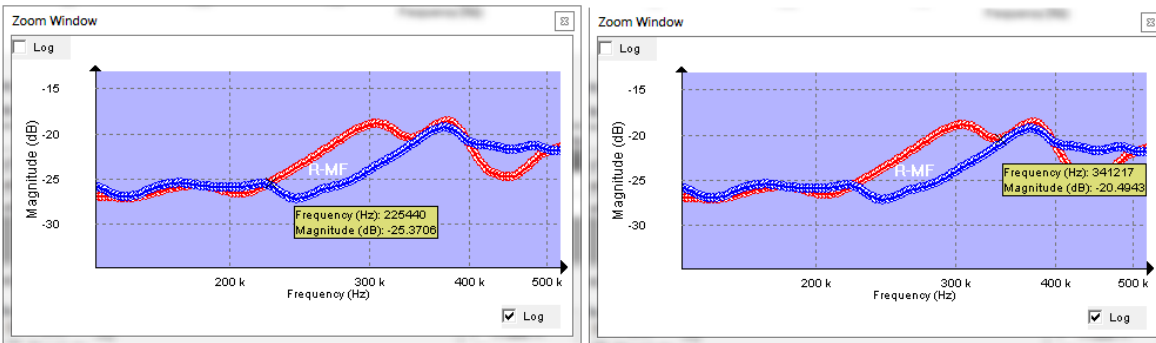
Berikut indikasi perubahan bentuk kurva dengan adanya titik perpotongan awal dan akhir diantara kurva awal pengukuran dengan kurva setelah diberi gangguan pada rentang frekuensi rendah dan menengah seperti pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil Tabel 2, disimpulkan terjadi gangguan terjadi pada daerah:

- 1) *Low frequency* dimana tingkat gangguan tampak jelas dan masih tidak terlalu berat. Gangguan terletak pada kerusakan inti transformator
- 2) *Middle frequency* dimana tingkat gangguan masih sangat ringan. Gangguan terletak pada belitan kumparan transformator.
- 3) *High frequency* masih dalam keadaan normal dan tidak mengalami gangguan.



(a) (b)
Gambar 19. Titik-titik perpotongan awal (a) dan akhir (b) yang mengindikasikan gangguan transformator pada tingkat frekuensi rendah.



(a) (b)
Gambar 20. Titik-titik perpotongan awal (a) dan akhir (b) yang mengindikasikan gangguan transformator pada tingkat frekuensi menengah.

Tabel 2. Hasil *Frequency Response Analysis* berdasarkan DL/T 911-2004

Nilai Frekuensi	Deformasi berat	Deformasi sedang	Deformasi ringan	Belitan Normal
R-LF = 0.79	RLF < 0.6	0.6 <= R-LF < 1	1 <= R-LF < 2	2 <= R-LF
R-MF = 0.61		R-MF < 0.6	0.6 <= R-MF < 1	1 <= R-MF
R-HF = 1.03				0.6 <= R-HF

KESIMPULAN

A. Saran

- Ada beberapa indikasi yang menyebabkan perubahan struktur mekanis dari transformator salah satunya seperti gangguan pada transportasi, dan gangguan hubungan singkat. Namun pada PT. PLN Area Kebon Jeruk yang dapat disimpulkan kondisi transformator masih dalam keadaan baik. Tidak ada gangguan yang cukup signifikan pada transformator itu sendiri.
- Berdasarkan hasil uji analisis dengan metode SFRA di dapat beberapa

kondisi normal dan juga kondisi gangguan pada transformator. Salah satu kondisi normalnya didapat nilai faktor relatif yang telah dibandingkan dengan standar DL/T911-2004 adalah $R-LF = 2.76 > 2$, $R-MF = 3.89 > 1$, $R-HF = 1.73 > 0.6$. Sementara salah satu kondisi gangguan yang terjadi didapatlah nilai faktor relatif yang juga telah dibandingkan dengan standar DL/T 911-2004 adalah $R-LF = 0.6 < 0.79 < 1$, $R-MF = 0.6 < 0.61 < 1$, $R-HF = 1.03 > 0.6$. Nilai R-LF dan R-MF menggambarkan tingkat gangguan ringan. Dimana gangguannya terletak pada inti transformator dan belitan kumparan transformator.

B. Saran

1. Berdasarkan pengamatan di lapangan, diketahui bahwa ada beberapa faktor yang harus diperhatikan selama melakukan pengujian. Pengujian sebaiknya dilakukan dengan 2 (dua) buah transformator yang identik agar mendapatkan sebuah perbandingan untuk memperkecil kesalahan analisis pada saat pengujian. Atau dilakukn pengujian berulang untuk mencapai pengukuran yang lebih baik.
2. Setiap hasil pengujian harus disimpan yang nantinya akan digunakan sebagai sampel perbandingan untuk pengujian selanjutnya. Karena sesuai standar yang diterapkan pengujian SFRA ini harus dilakukan minimal 2 (dua) tahun sekali. Tapi sebaiknya untuk lebih memantau transformator ada baiknya setahun kemudian dilakukan pengujian kembali untuk melihat perubahan yang terjadi agar cepat ditangani.

REFERENSI

1. A. Kraetge, M. Krüger, J. L. Velásquez, H. Viljoen, A. Dierks, *Aspects of the Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers*, CIGRE 2009, 6'th Southern Africa Regional Conference
2. Matz Ohlen and Peter Werelius, *Application and Interpretation of Frequency Response Analysis (FRA) for Power Transformers Using the Sweep Frequency Method*, Power Transformer Health Monitoring and Maintenance Symposium 2008 - ABB University South Africa and ABB School of Maintenance
3. Luwendran Moodley, Brian de Klerk, *Sweep Frequency Response Analysis As A Diagnostic Tool To Detect Transformer Mechanical Integrity*, eThekweni Electricity,
4. Megger. 2008. *FRAX User's Manual*. Tersedia : <http://www.megger.com> diakses pada : 27-4-2014
5. Republic of China. 2004. DL/T 911-2004. *Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers*. China
6. Eurodoble FRA Subcommittee, *Specification For Frequency Response Analysis (FRA) Testing*, First Edition November 1999, C/TN3907.REP
7. Dimas Fathoni, *Analisis Awal Gangguan Mekanis Pada Transformator Distribusi Dengan Metode Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)*, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti, Jakarta, 2014.